

## مدل‌سازی تعدیل شدت جزیره‌های گرمای شهری با رویکرد پشت‌بام‌های سبز (مطالعه موردی: منطقه ۱۷ شهر تهران)

معصومه مقبل - استادیار گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران  
علی‌اکبر شمسی‌پور\* - دانشیار گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران  
عبدالله پیام - کارشناس ارشد گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۵/۱۲ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۱/۲۹

### چکیده

جزیره گرمای شهری، که از پیامدهای شهرنشینی و شهرسازی با تمرکز فعالیت‌های انسانی است، امروزه به مسئله‌ای با اهمیت در آب‌وهوای شهری تبدیل شده است. هدف از پژوهش حاضر تبیین و ارزیابی اثر توسعه پشت‌بام‌های سبز به عنوان راهکاری در کاهش شدت جزیره‌های گرمای شهری در منطقه ۱۷ شهرداری تهران است. بدین منظور، با به‌کارگیری روش ترکیبی آماری و مدل‌سازی عددی خردمقیاس اقلیمی به واکاوی میزان اثر پشت‌بام‌های سبز بر تعدیل شدت جزایر گرمای شهری پرداخته شد. با استفاده از اطلاعات به‌دست‌آمده از داده‌های میدانی (دماسنج‌های نصب‌شده در هر دو پشت‌بام) و همچنین خروجی‌های مدل خردمقیاس Envi-met در فصول مختلف سال ۲۰۱۶، اختلاف دمای بین دو پشت‌بام سبز و مرجع استخراج شد. نتایج نشان داد که مقدار اختلاف دما در بعدازظهر و شب بیشتر از صبح است. همچنین، بیشینه اختلاف دمای هوای بین دو بام سبز و مرجع در فصل پاییز به‌دست آمد. با واکاوی داده‌های میدانی و خروجی گرافیکی مدل مشخص شد که بیشینه اختلاف دمایی بین آن‌ها هنگام شب رخ داده است؛ یعنی زمانی که شدت جزیره گرمای شهری در بیشینه وضعیت خود است. هر دوی اطلاعات اندازه‌گیری‌شده و خروجی مدل فیزیکی اقلیمی گویای قابلیت مناسب پشت‌بام‌های سبز در تعدیل شدت جزیره گرمای شهری است.

واژگان کلیدی: بام‌های سبز، تهران، جزیره گرمای شهری، شبیه‌سازی خردمقیاس اقلیمی.

### مقدمه

افزایش جمعیت و توسعه روزافزون شهری، افزون بر پیامدهایی مانند مصرف بالای انرژی، افزایش ترابری شهری، تراکم و فشرده‌گی بافت شهری، آلودگی هوا و دگرگونی آب‌وهوای شهری را نیز در پی داشته است. در این میان، شاید مشهودترین جلوه این دگرگونی‌ها اختلاف دما بین مراکز شهری و حومه آن‌هاست که به نام جزیره گرمای شهری معروف است (اوک، ۱۹۸۲: ۱۹). جزیره گرمای شهری از مستندترین پدیده‌های تغییرات اقلیم در فضاهای شهری است و به تقریب از یک قرن پیش شناخته شده است (سینفا و همکاران، ۲۰۱۱: ۳۹). دمای بالاتر شهرها به دلیل توازن دمایی مثبت مناطق شهری است که با تولید گرمای انسان‌ساخت، ذخیره اضافی تابش خورشیدی توسط ساختارهای شهر، کمبود فضای سبز و مخازن خنک، جریان هوا در خیابان‌های شهری محدود شده است (اوک، ۱۹۹۵: ۱۰۲). جزیره گرمایی در واقع از اختلاف در ویژگی‌های فیزیکی مصالح سازنده شهر و روستا ناشی می‌شود. مصالحی مانند آسفالت، آجر، و بتن در مقایسه با درختان، چمن، و سطوحی که با آب پوشیده شده‌اند گرما را ساده‌تر جذب می‌کنند، اما با کارایی کمتری باز

پس می‌دهند. با توجه به موارد ذکر شده، کاهش تولید گرمای انسان ساخت و اعمال تغییراتی مانند استفاده از مصالح با ضریب بازتاب و انتشار گرمایی بالا و توسعه فضاهای سبز به‌عنوان راهکارهای مؤثر برای کاهش شدت جزیره گرمایی توصیه شده‌اند. بام سبز یکی از رویکردهای نوین در نظام شهرسازی و برخاسته از مفاهیم توسعه پایدار است که از آن می‌توان با هدف افزایش سرانه فضای سبز، ارتقای کیفیت محیط زیست، و توسعه پایدار شهری بهره برد. استفاده کاربردی از بام‌ها می‌تواند امکان بهره‌برداری بهینه از زمین‌های شهری قلمداد شود. بام‌های سبز با عناوینی چون باغبانی در پشت‌بام یا فناوری کاشت گیاه در پشت‌بام، بام‌های زنده، زیست‌بام، و باغ بام شناخته می‌شوند. بام سبز در واقع اکوسیستم زنده است و شرایط مطلوبی برای محیط زیست شهری فراهم و آن را بهره‌ورتر و پایدارتر می‌کند (کشتکار فلاحی و همکاران، ۱۳۸۹: ۱۷). مساحت زمین‌های آزاد موجود در محیط شهری کاملاً محدود است، اما از نظر اقتصادی بسیار ارزشمند است. اجرای فناوری‌های تعدیل‌کننده بزرگ‌مقیاس در زمین‌های شهری نسبتاً دشوار است. در عین حال، در مناطق شهری نسبت فضاهای اختصاص یافته به گیاهان و درخت‌ها یا سایر زیرساخت‌های کاهنده دما به دلیل توسعه ساختمان‌های جدید کم است (اسمیت و لومور، ۲۰۰۸). از طرف دیگر، بام‌ها، با آگاهی بر محدودبودن هزینه مربوطه، فضای بسیار مناسبی برای اجرای روش‌های تعدیل‌کننده به‌نظر می‌رسند (مقبل و همکاران، ۱۳۹۶: ۱۹۲).

کلان‌شهر تهران، به‌عنوان مرکز سیاسی، اقتصادی، و ارتباطی ایران، اضافه بر اینکه پرجمعیت‌ترین شهر کشور است، از الگوی شهرسازی به نسبت نامنظم و بدون برنامه برخوردار است. از سویی دیگر، سرانه فضای سبز در این شهر کمتر از حد استاندارد است و افزون بر آن توزیع فضای سبز در گستره شهر و در مناطق مختلف شهرداری تهران به‌صورت ناهمگن است. این حالت سبب شده تا در شهر تهران جزیره گرمایی به‌صورت مجمع‌الجزایری با هسته‌های متعدد متمرکز در مراکز فعالیتی مختلف شهر توزیع شود. همچنین، با وجود پهنه‌های فعالیتی، کاربری‌ها، رویه‌های سطحی مختلف، و هسته‌های گرمایی و سرمایی در کنار هم دیده می‌شود (شمسی‌پور و همکاران، ۱۳۹۱: ۱۳۱). شدت دمای جزایر گرمایی رخ داده در شهر نه تنها بر محیط زیست، کیفیت زندگی، و نیازهای روحی و جسمی شهروندان در زندگی شهری اثرگذار است، بلکه بر میزان مصرف انرژی در سرمایش مکانیکی، انتشار آلاینده‌ها و گازهای گلخانه‌ای نیز اثرهای منفی قابل توجهی دارد (خسروی و قبادی، ۱۳۹۳: ۷۰). اگرچه تأثیر احتمالی بام‌های خنک و بام‌های سبز بر انرژی به‌خوبی بررسی نشده است، اطلاعات موجود درباره ظرفیت تعدیل‌کنندگی آن‌ها نسبتاً محدود است. بیشتر مطالعات موجود بر پایه مدل‌سازی میان‌مقیاس است و نتایج حاصل کاملاً به ویژگی‌های منطقه‌ای و فرض‌های انجام‌شده بستگی دارد؛ درحالی‌که مطالعات تجربی بسیار کمی در دسترس هست. در برخی مطالعات تلاش شده است تا ظرفیت آب‌وهوایی دو فناوری، چه به کمک شبیه‌سازی چه به کمک روش‌های تجربی، مقایسه شود. باوجوداین، بیشتر مطالعات مربوط به ساختمان و آب‌وهوا بوده است. از آنجا که میزان تأثیرگذاری بام‌های سبز در محیط زیست شهری با ویژگی‌های فیزیکی و ساختاری شهرها تغییر می‌کند، مطالعه اثر تعدیل‌کنندگی این نوع فضاها بر شدت جزایر گرمای شهر تهران امری ضروری است. در سال‌های اخیر، رویکرد پژوهشگران در مطالعه جزیره گرمایی به سمت ارائه راهکار برای کاهش آثار این پدیده گرایش یافته است. بیشتر توصیه این پژوهشگران افزایش فضای سبز و استفاده از فضاهای بدون استفاده مانند بالکن‌ها و بام‌ها برای افزایش فضای سبز است. از جمله محققانی که به ارائه راهکارهایی برای کاهش شدت جزیره گرمایی پرداخته‌اند می‌توان روزنفلد و همکاران (۱۹۹۸)، یاماماتو (۲۰۰۶)، روزنزوگ و همکاران (۲۰۰۶)، اوبرندروفر و همکاران (۲۰۰۷)، اسمیت و لومور (۲۰۰۸)، اکبری و رز (۲۰۰۸)، سولسکی و همکاران (۲۰۰۸)، سوومی و کایک (۲۰۱۰)، انیشی و همکاران (۲۰۱۰)، کارلسکی و همکاران (۲۰۱۰)، سینفا و همکاران (۲۰۱۱)، و پمپی و هاوکینز (۲۰۱۱) و از میان

مطالعات محققان ایرانی نیز می‌توان پژوهش‌های ملکوتی (۲۰۱۰)، مهملویی و همکاران (۲۰۱۲)، شاه‌محمدی و همکاران (۲۰۱۲)، لاندھولم و ویلیامز (۲۰۱۵)، مقبل و عرفانیان سلیم (۲۰۱۷)، و آزاناس و همکاران (۲۰۱۸) را نام برد. اضافه بر پژوهش‌های بالا، اوبرندروفر و همکاران (۲۰۰۷)، پمپی و هاوکینز (۲۰۱۱)، پرمپیداک و نمپرگای (۲۰۱۲)، مهدیان ماهفروزی و همکاران (۱۳۹۴)، و خسروی و قبادی (۱۳۹۳) مطالعاتی با روش‌های به‌طور غالب شبیه‌سازی همچون مدل DROB، اطلاعات میدانی در رابطه با اثر پشت‌بام‌های سبز و فضاهای سبز شهری در تعدیل دمای محیط شهری و آثار سرمایشی و اثر آن در مصرف برق انجام داده‌اند.

با توجه به مطالعات ارائه‌شده، در بیشتر پژوهش‌ها به بررسی شدت جزیره گرمای شهری پرداخته شده است که برای شناخت آن از داده‌های میدانی، سنجش‌ازدوری، و مدل‌سازی در مناطق شهری بهره گرفته شده است. محققانی نیز برای کاهش شدت جزیره گرمای شهر راهکارهایی ارائه داده‌اند که یکی از آن‌ها افزایش فضای سبز در مناطق شهری است. اما با توجه به ارزش افزوده بالای زمین و پایین بودن مساحت فضای سبز، به‌نظر می‌رسد که فناوری بام سبز در کلان‌شهرهای ایران به‌علت بهبود و پایداری کیفیت محیط زیست گزینه مناسبی است. به عبارت دیگر، بام سبز یکی از رویکردهای نوین معماری و شهرسازی و برخاسته از مفاهیم توسعه پایدار است که از آن می‌توان در جهت افزایش سرانه فضای سبز، ارتقای کیفیت محیط زیست، و توسعه پایدار شهری بهره برد (رضوانی و همکاران، ۱۳۹۵: ۵۴۷). از این‌رو، در پژوهش حاضر تلاش می‌شود تا اثر بام‌های سبز بر کاهش شدت جزایر گرمایی در شهر تهران با استفاده از مدل‌سازی و برداشت میدانی ارزیابی و مشخص شود که استفاده از این فناوری در شهر تهران با توجه به نوع اقلیم و ویژگی‌های جغرافیایی آن تا چه اندازه می‌تواند در زمینه کاهش جزایر گرمایی و افزایش کیفیت محیط زیست کمک‌کننده باشد.

## مواد و روش‌ها

برای شبیه‌سازی عددی محدوده شهرداری منطقه ۱۷ شهرداری تهران، با هدف تعدیل جزیره گرمای شهری با استفاده از پشت‌بام‌های سبز، داده‌های جوی ایستگاه مهرآباد در مقیاس زمانی طولانی‌مدت (۱۹۵۱-۲۰۱۶) برای شناخت وضعیت غالب دمای هوا، و سال ۲۰۱۶ متغیرهای دما، رطوبت نسبی، کدهای هوای حاضر، جهت و سرعت باد و ساعات تابش خورشید با مقیاس‌های ماهانه و ساعتی از سازمان هواشناسی کشور اخذ شد. در گام بعدی، دو پشت‌بام متفاوت دارای بام سبز و بدون بام سبز- در محیط نرم‌افزار خردمقیاس اقلیمی (Envi-met) با داده‌های ایستگاهی و آزمون انواع پوشش‌های گیاهی مورد استفاده در احداث پشت‌بام‌های سبز شبیه‌سازی شد.

سپس، برای کالیبره کردن و صحت‌سنجی خروجی‌های مدل با شرایط واقعی از داده‌های واقعی ثبت‌شده با دماسنج‌های تعبیه‌شده در پشت‌بام‌ها در محدوده شهرداری منطقه ۱۷ استفاده شد. برای این هدف، دو دستگاه دیتالاگر دما و رطوبت در ارتفاع یک و نیم متری بالای دو بام (یکی دارای بام سبز و دیگری بدون بام سبز) نصب شد و داده‌های مربوط به دما و رطوبت هوای اطراف دو پشت بام در مقیاس زمانی ۱۵ دقیقه‌ای اندازه‌گیری شد. برای اجرای این اندازه‌گیری‌ها از دیتالاگر مدل HD37AB1347 استفاده شد. شکل ۱ محل نصب دیتالاگرها بر بالای دو پشت بام را نمایش می‌دهد. توضیح این نکته لازم است که دیتالاگرها در ارتفاع ۱/۵ متری بالای دو بام و در داخل اسکرین باکس نصب شدند.



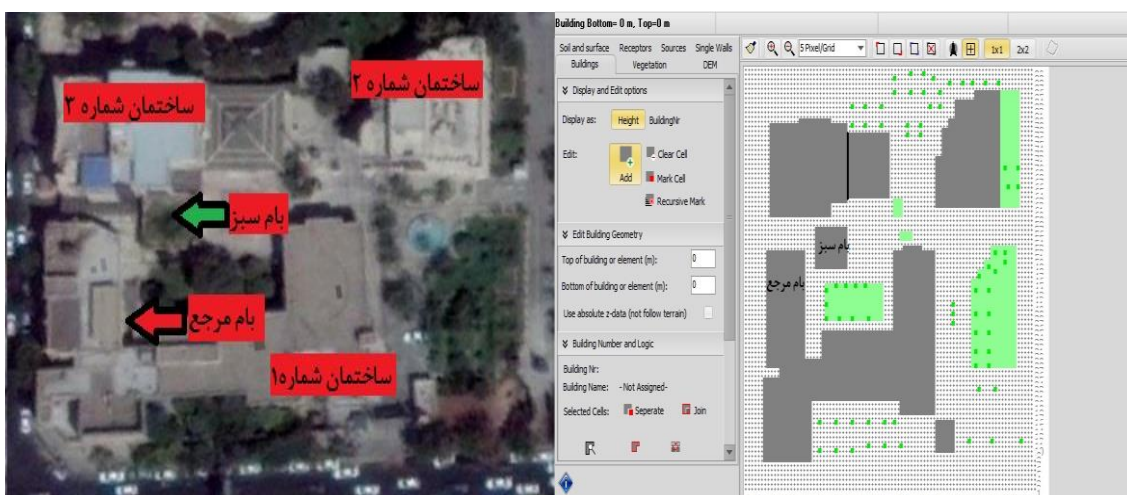
شکل ۱. نحوه نصب دیتالاگرها در یک و نیم متری بالای دو بام در خارج از جعبه اسکریبن (سمت راست: بام سبز؛ سمت چپ: بام معمولی)

در ادامه برای هر فصل سال با استفاده از نرم‌افزار خرداقلیم Envi-met شبیه‌سازی انجام شد. شبیه‌سازی انجام شده برای طول ۲۴ ساعت شبانه‌روز انجام و برای خروجی آن‌ها توالی زمانی یک‌ساعته تعیین شد. برای شرایط جوی هم‌زمان آن‌ها از داده‌های ایستگاه‌های دیتالاگر تعبیه شده در پشت‌بام‌ها استفاده شد. بنابراین، داده‌های عناصر جوی ورودی مدل شبیه‌ساز از داده‌های دیتالاگرها به دست آمد. داده‌های طراحی و گرافیکی مدل هم با اخذ تصویر محدوده از گوگل ارث و طراحی آن در محیط سه‌بعدی برنامه با مقیاس افقی یک متر در یک متر و قائم دو متر در متر وارد شد. در ادامه رابطه دماهای خروجی ساعتی مدل با دماهای ساعتی اندازه‌گیری شده در دیتالاگرها برای فصل‌های مختلف سال با روش ضرب همبستگی محاسبه شد. در نهایت، خروجی شبیه‌سازی‌های انجام شده با مدل خردمقیاس اقلیمی Envi-met با داده‌های واقعی مقایسه و میزان دقت مدل ارزیابی شد. در پایان با شناخت علل مختلف شکل‌گیری جزیره‌های گرمایی و محاسبه میزان اثر خنک‌کنندگی پشت‌بام‌های سبز، راهکارهای پژوهشی و مدیریتی برای کاهش شدت جزیره گرمای شهری در مقیاس‌های خرد و محلی آزمون شد. شکل ۲ محدوده مورد مطالعه در منطقه ۱۷ شهرداری تهران را نمایش می‌دهد.



شکل ۲. محدوده مورد مطالعه (منطقه ۱۷ شهرداری تهران)

با توجه به اینکه هسته‌های گرمای شهری بیشتر در شرایط هوای آرام تشکیل می‌شود، در همه فصل‌های مورد مطالعه شرایط هوای آرام در نظر گرفته شده است. در فرایند مدل‌سازی نخست شبیه‌سازی با شرایط واقعی منطقه انجام شد (شکل ۳). در گام بعدی شبیه‌سازی صرفاً برای دو بام سبز و بام مرجع بدون در نظر گرفتن ساختمان‌ها، خیابان‌ها، پوشش گیاهی، و پارک‌های اطراف انجام شد. با هدف شبیه‌سازی محدوده مورد مطالعه در فرایند مدل‌سازی، خروجی‌ها به صورت ساعتی ذخیره شدند که امکان نمایش ساعت به ساعت خروجی‌ها به صورت گرافیکی و عددی را می‌داد. اما به دلیل حجم زیاد خروجی‌ها و تفاوت‌های اندک میان خروجی‌ها با فاصله زمانی کم، در نتیجه خروجی‌ها با فواصل زمانی شش ساعته به نمایش گذاشته شدند. دمای هوای به دست آمده از خروجی‌های مدل به دلیل محاسبه وضعیت دمای بالای پشت‌بام‌ها در ارتفاع ۵ متری محاسبه شده است. در این مرحله، ابتدا ویژگی‌های دمایی به صورت گرافیکی برای ساعت‌های ۰۶:۰۰، ۱۲:۰۰، ۱۸:۰۰ و ۲۳:۰۰ در هر فصل از سال تحلیل و تفاسیر مربوط به هر یک ارائه می‌شود.

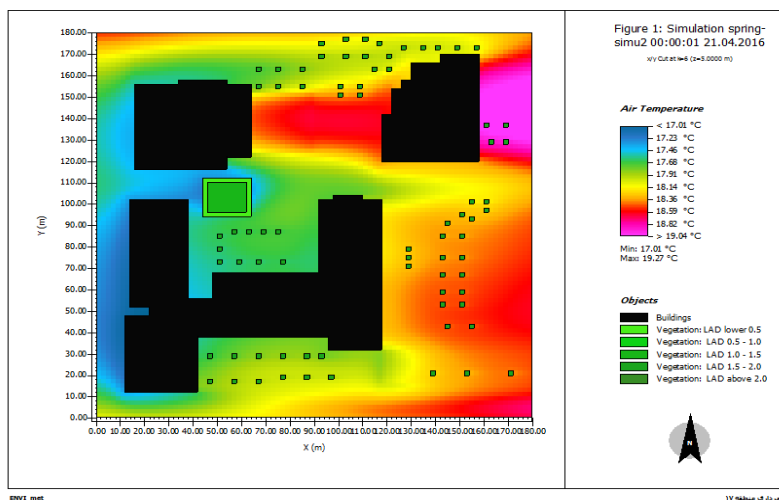


شکل ۳. تصویر سمت راست برگرفته از گوگل ارث و تصویر سمت چپ طراحی شرایط واقعی محدوده مورد مطالعه در مدل Envi-met

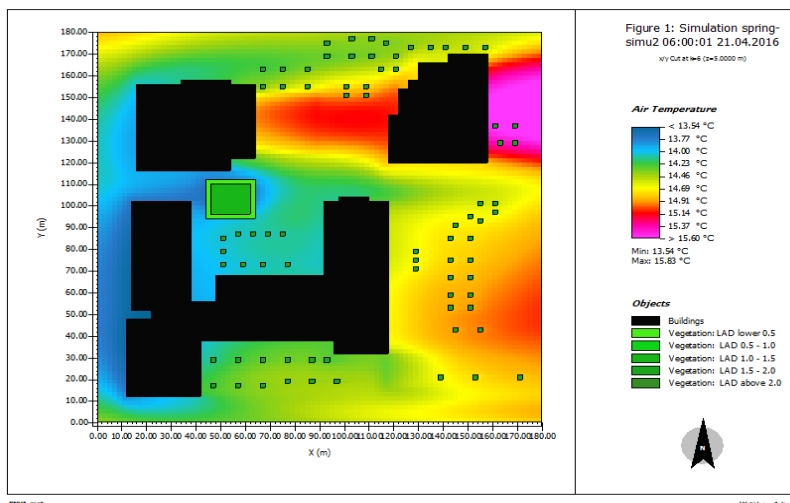
## یافته‌های پژوهش

### وضعیت دمای هوای بالای دو پشت‌بام در فصل بهار

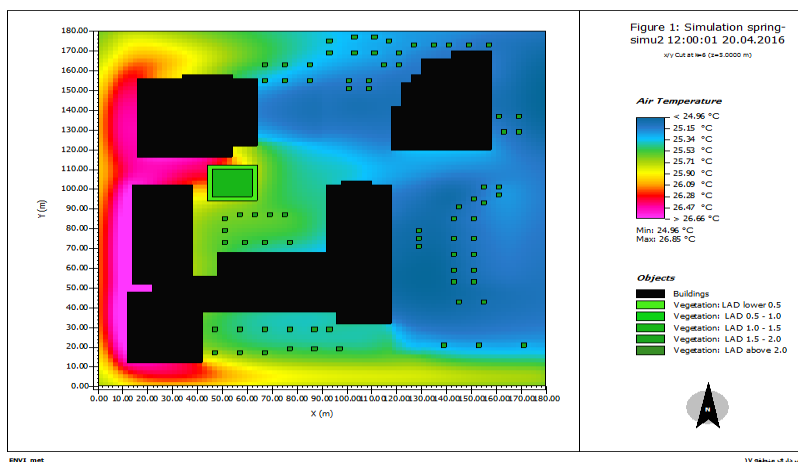
بر اساس نتایج حاصل از پژوهش، در فصل بهار کمینه دما در ساعات اولیه صبح در اطراف ساختمان شماره ۱ واقع در غرب نقشه مورد نظر مشاهده می‌شود. بیشینه دما نیز در این ساعات متعلق به ساختمان شماره ۲ واقع در شمال شرقی نقشه است، ولی در اطراف بام سبز در قسمت غربی نقشه اختلاف دمایی چندانی مشاهده نمی‌شود. بدین ترتیب، در این ساعات اختلاف دمایی چندانی بین دو بام سبز و مرجع رخ نداده است. حتی در بعضی از ساعات مقدار دمای بام سبز از بام مرجع بیشتر بوده است. اما در ساعات بعد از ظهر یک دامنه افزایشی اختلاف دما بین دو بام مشاهده می‌شود؛ یعنی هر چه به ساعات شب نزدیک می‌شویم مقدار اختلاف دما بین دو بام افزایش می‌یابد. بنابراین، کمینه اختلاف دما بین دو بام در طول روز در ساعات ۰۰:۰۰ و ۰۶:۰۰ مشاهده می‌شود (شکل‌های ۴ و ۵) و بیشینه اختلاف نیز در ساعت ۲۲:۰۰ رخ داده است. به صورت کلی، بیشینه اختلاف دما بین دو بام در فصل بهار و شب‌ها بیشتر از روز است (شکل‌های ۶ تا ۸).



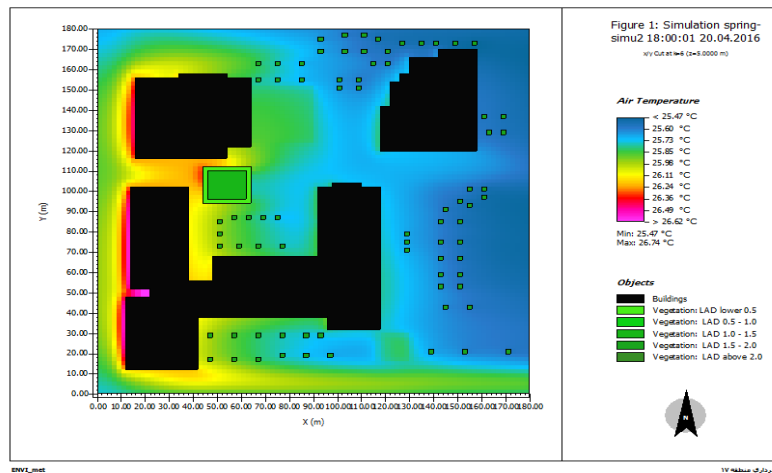
شکل ۴. دمای هوای مجاور دو بام سبز و مرجع در منطقه مورد مطالعه در فصل بهار، ساعت ۰۰:۰۰



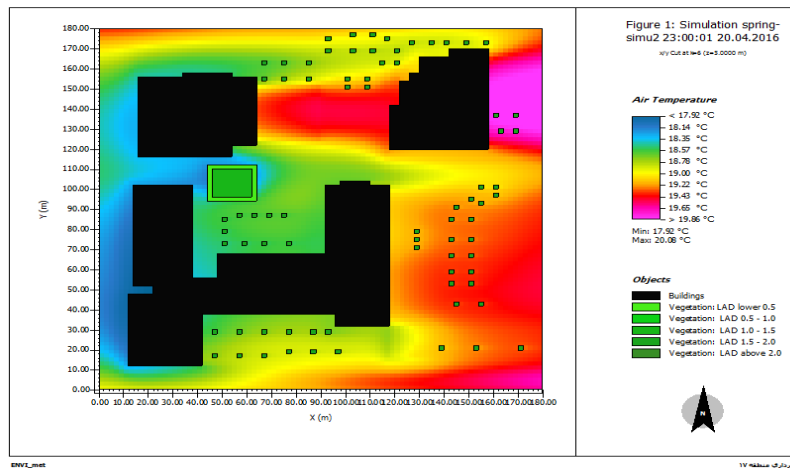
شکل ۵. دمای هوای مجاور دو بام سبز و مرجع در منطقه مورد مطالعه در فصل بهار، ساعت ۰۶:۰۰



شکل ۶. دمای هوای مجاور دو بام سبز و مرجع در منطقه مورد مطالعه در فصل بهار، ساعت ۱۲:۰۰ بعد از ظهر



شکل ۷. دمای هوای مجاور دو بام سبز و مرجع در منطقه مورد مطالعه در فصل بهار، ساعت ۱۸:۰۰

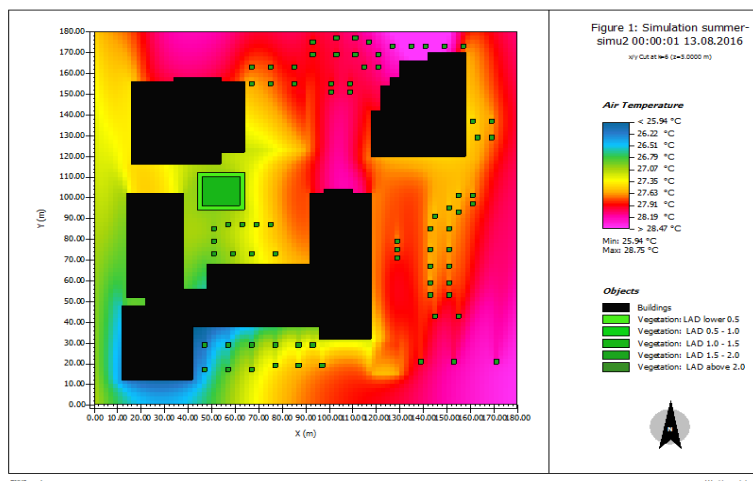


شکل ۸. دمای هوای مجاور دو بام سبز و مرجع در منطقه مورد مطالعه در فصل بهار، ساعت ۲۳:۰۰

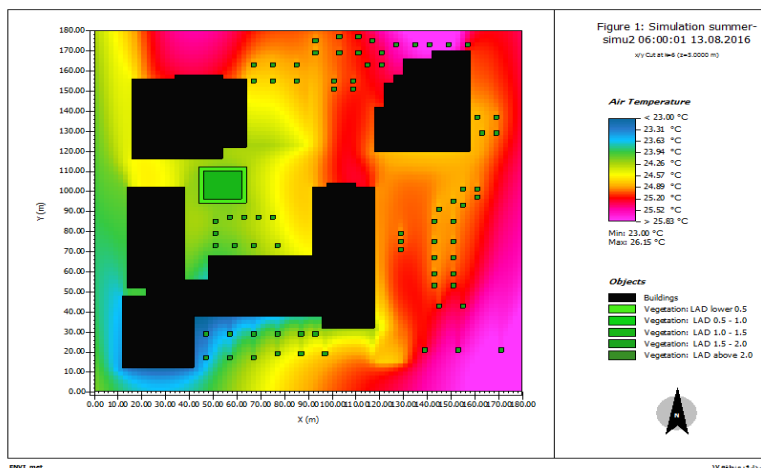
### وضعیت دمای هوای بالای دو پشت‌بام در فصل تابستان

همان‌طور که در شکل‌های ۹ تا ۱۳ قابل مشاهده است، در فصل تابستان کمیته دما در ساعات‌های آغازین صبح در اطراف بام سبز واقع در غرب نقشه مشاهده می‌شود. در این ساعات‌ها بیشینه دما متعلق به ساختمان در ورودی شهرداری منطقه ۱۷ واقع در جنوب شرقی نقشه مورد نظر است. در مرحله بعد گرم‌ترین نقاط مربوط به ساختمان شماره ۲ واقع در شمال نقشه است. به دلیل کمیته دمای ساعات‌های صبحگاهی و نبود تبخیر و تعرق کمیته اختلاف دما بین دو بام مشاهده می‌شود و در این ساعات، همانند فصل بهار، مقدار اختلاف بین دو بام بسیار ناچیز است و همچنین اختلاف دمای بین دو بام عکس می‌شود؛ به طوری که مقدار دمای بام سبز در این ساعات از دمای بام مرجع بیشتر می‌شود. اما در ساعات بعد از ظهر حدود ساعت ۱۸ مقدار اختلاف دما بین دو بام افزایش می‌یابد و تا ساعت ۲۳ ادامه دارد. بنابراین، هرچه به ساعت شب نزدیک‌تر می‌شویم مقدار اختلاف دما بین دو بام نیز افزایش می‌یابد.

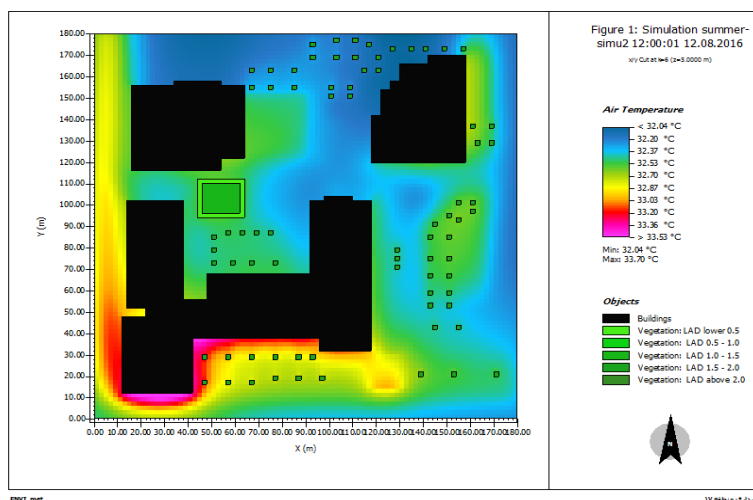
در فصل تابستان کمیته اختلاف بین دو بام سبز و بام مرجع در ساعت ۱۲:۰۰ ظهر ثبت شده و در ضمن اختلاف دمای آن‌ها عکس شده، در صورتی که بیشینه اختلاف در ساعت ۲۳ رخ داده است. بنابراین، در فصل تابستان همانند فصل بهار مقدار اختلاف دما در ساعات روز بسیار ناچیز است و بیشینه اختلاف دما بین دو بام در ساعات شب دیده می‌شود.



شکل ۹. دمای هوای مجاور دو بام سبز و مرجع در منطقه مورد مطالعه در فصل تابستان، ساعت ۰۰:۰۰

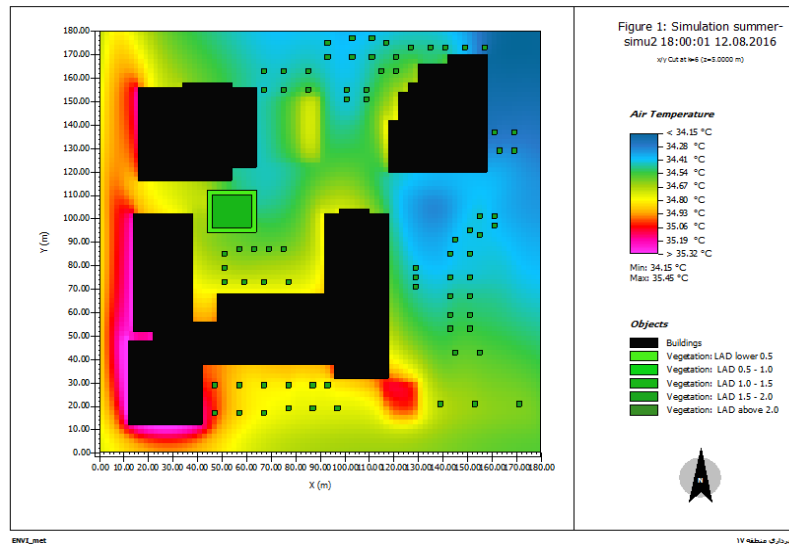


شکل ۱۰. دمای هوای مجاور دو بام سبز و مرجع در منطقه مورد مطالعه در فصل تابستان، ساعت ۰۶:۰۰

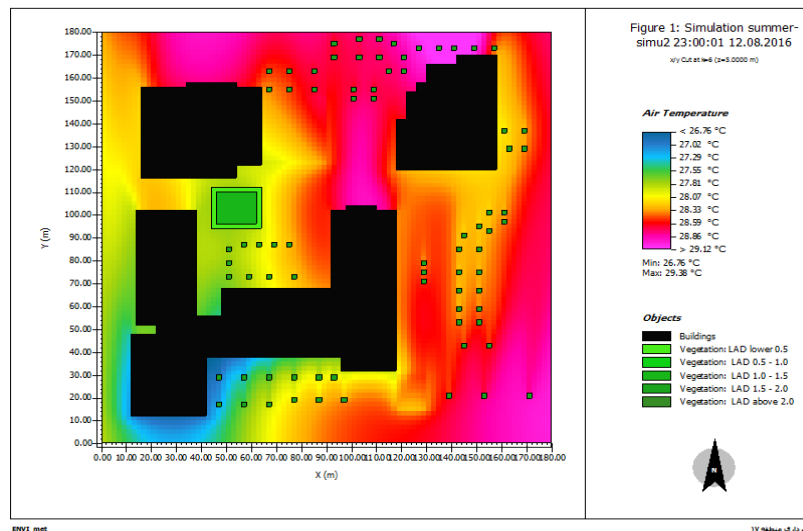


شکل ۱۱. دمای هوای مجاور دو بام سبز و مرجع در منطقه مورد مطالعه در فصل تابستان، ساعت ۱۲:۰۰ بعد از ظهر





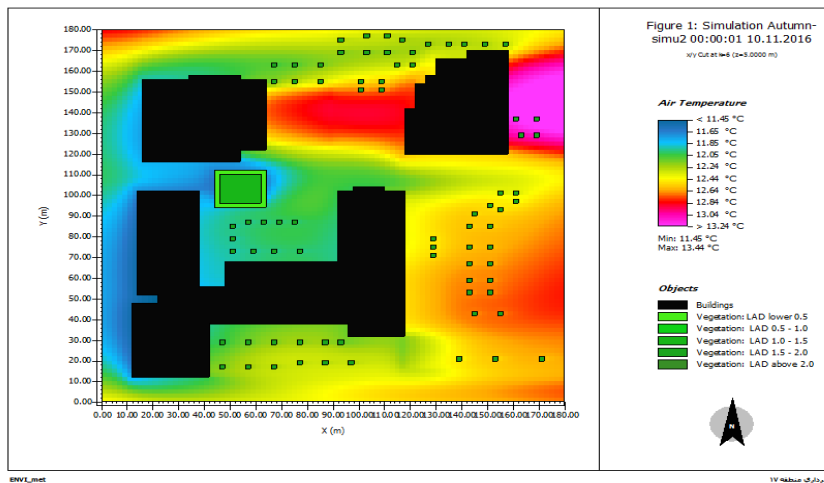
شکل ۱۲. دمای هوای مجاور دو بام سبز و مرجع در منطقه مورد مطالعه در فصل تابستان، ساعت ۱۸:۰۰



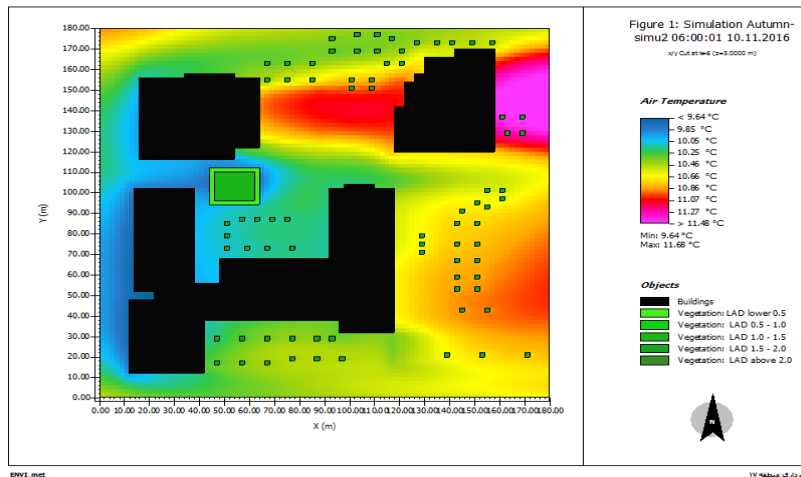
شکل ۱۳. دمای هوای مجاور دو بام سبز و مرجع در منطقه مورد مطالعه در فصل تابستان، ساعت ۲۳:۰۰

### وضعیت دمای هوای بالای دو پشت‌بام در فصل پاییز

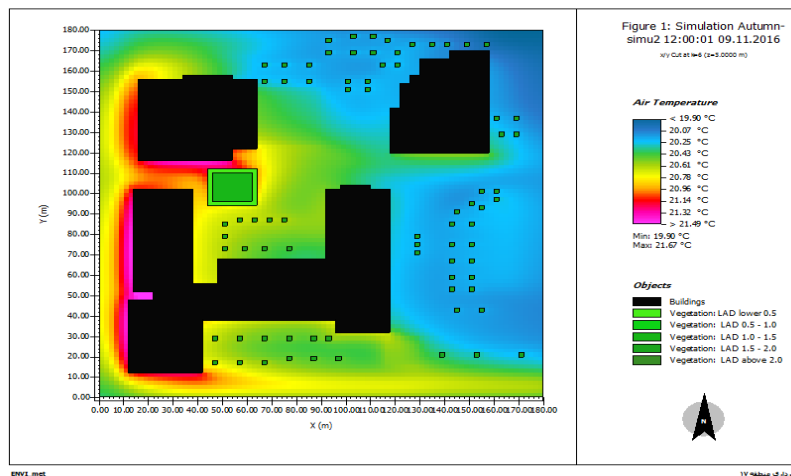
براساس شکل‌های ۱۴ تا ۱۸، در فصل پاییز کمینه دما در ساعات‌های اولیه صبح متعلق به ساختمان شماره ۱ و اطراف بام سبز واقع در غرب نقشه مشاهده می‌شود. بیشینه دما نیز در این ساعات در اطراف ساختمان شماره ۲ واقع در شمال شرقی نقشه ثبت شده است. مقدار اختلاف دما بین دو بام سبز و مرجع از ساعت ۰۰:۰۰ آغاز می‌شود. ولی در طول ساعات صبح مقدار اختلاف بین دو بام کاسته می‌شود؛ در صورتی که در ساعات بعدازظهر یک دامنه افزایشی اختلاف دما مشاهده می‌شود و هرچه به ساعات شب و غروب آفتاب نزدیک می‌شود مقدار اختلاف دما بین دو بام افزایش می‌یابد؛ در صورتی که بیشینه اختلاف دمای بین دو بام سبز و مرجع در این فصل در ساعت ۱۸ رخ داده است و کمینه اختلاف نیز در ساعات صبح مشاهده می‌شود. در این فصل، همانند دو فصل بهار و تابستان، بیشینه مقدار اختلاف دما در طول شب رخ داده است.



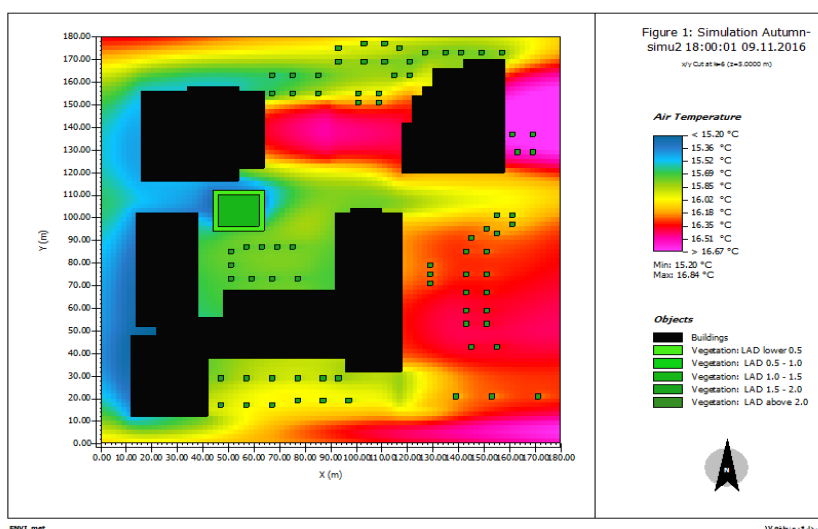
شکل ۱۴. دمای هوای مجاور دو بام سبز و مرجع در منطقه مورد مطالعه در فصل پاییز، ساعت ۰۰:۰۰



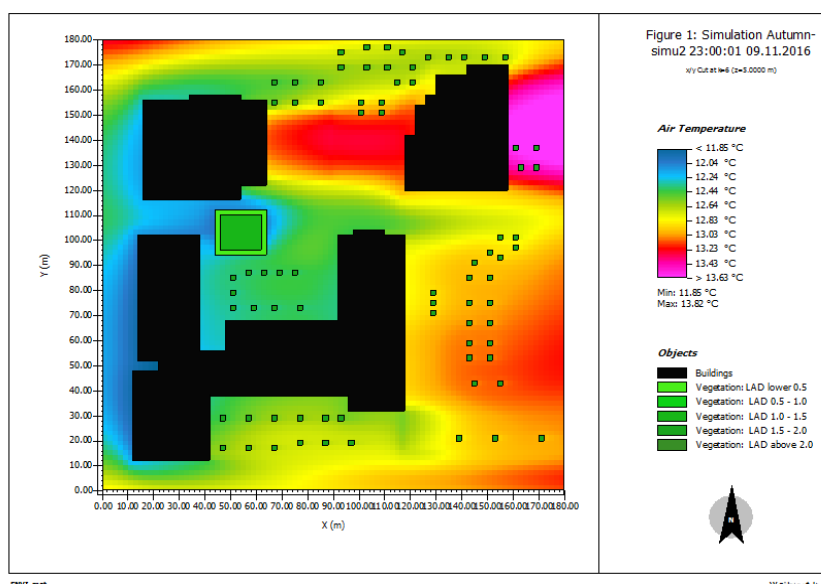
شکل ۱۵. دمای هوای مجاور دو بام سبز و مرجع در منطقه مورد مطالعه در فصل پاییز، ساعت ۰۶:۰۰



شکل ۱۶. دمای هوای مجاور دو بام سبز و مرجع در منطقه مورد مطالعه در فصل پاییز، ساعت ۱۲:۰۰



شکل ۱۷. دمای هوای مجاور دو بام سبز و مرجع در منطقه مورد مطالعه در فصل پاییز، ساعت ۱۸:۰۰



شکل ۱۸. دمای هوای مجاور دو بام سبز و مرجع در منطقه مورد مطالعه در فصل پاییز، ساعت ۲۳:۰۰

### ارتباط بین داده‌های مدل با داده‌های واقعی

در تمام فصول اختلاف دمای بین دو بام در ساعات اولیه ناچیز بوده، ولی در ساعات بعدازظهر مقدار اختلاف دما بین بام سبز و مرجع افزایش یافته و در طول شب نیز بیشینه اختلاف مشاهده می‌شود. مقدار اختلاف دما در فصل بهار بیشتر از دو فصل پاییز و تابستان به‌دست آمد. در مرحله دوم در فصل پاییز بیشینه اختلاف دما رخ داده و در نهایت کمینه اختلاف دما بین دو بام سبز و مرجع در فصل تابستان ثبت شده است. بیشینه اختلاف دما در فصل بهار و تابستان در ساعت ۲۳ ثبت شده؛ در صورتی که بیشینه اختلاف دما بین دو بام در فصل پاییز در ساعت ۱۸ مشاهده شد. به‌صورت کلی، در هر سه فصل بیشینه اختلاف دما در طول شب بیشتر به‌دست آمد.

جدول ۱. همبستگی داده‌های مدل در شرایط واقعی و داده‌های ایستگاهی (میدانی)

میزان خطا	ضریب همبستگی	رابطه	تعداد داده	
٪۱۵	۰٫۳۲	$y = 0.2063x + 12.511$	۲۴	دمای هوای مجاور بام سبز (پاییز) مدل با واقعی
٪۵	۰٫۵۱*	$y = 0.3565x + 25.794$	۲۴	دمای هوای مجاور بام سبز (تابستان) مدل با واقعی
٪۵	۰٫۵۲*	$y = 0.3856x + 16.546$	۲۴	دمای هوای مجاور بام سبز (بهار) مدل با واقعی
٪۱۵	۰٫۳۷	$y = 0.1793x + 13.648$	۲۴	دمای هوای مجاور بام مرجع (پاییز) مدل با واقعی
٪۱۵	۰٫۳۲	$y = 0.3406x + 30.851$	۲۴	دمای هوای مجاور بام مرجع (تابستان) مدل با واقعی
٪۵	۰٫۵۳*	$y = 0.3272x + 19.857$	۲۴	دمای هوای مجاور بام مرجع (بهار) مدل با واقعی

ضریب همبستگی داده‌های ساعتی ۲۴ ساعته به دست آمده از خروجی مدل با داده‌های واقعی اندازه‌گیری شده روی پشت‌بام سبز برای هر فصل محاسبه شد (جدول ۱). ضریب همبستگی بین آن‌ها در فصل بهار و تابستان دارای همبستگی متوسط با سطح معناداری ۹۵ درصد اطمینان است. در صورتی که همبستگی بین داده‌های بام سبز مدل و داده‌های واقعی در فصل پاییز و همچنین همبستگی بین داده‌های بام مرجع مدل و داده‌های واقعی در فصل تابستان و پاییز کم و غیرمعنادار بودند، اما بین داده‌های بام مرجع مدل و داده‌های واقعی در فصل بهار با مقدار ۰٫۵۳ دارای ضریب همبستگی معنادار در سطح ۹۵ درصد اطمینان است. در بررسی و مقایسه نتایج به دست آمده از این پژوهش با سایر مطالعات انجام شده در این زمینه، به ویژه در آن دسته از مطالعات که از مدل Envi-met استفاده شده است، مشخص شد که در بیشتر این مطالعات اثرگذاری بام‌های سبز بر تلطیف شرایط خرد اقلیمی و آسایش حرارتی محیط بیرونی مورد تأیید است؛ به طوری که پنگ و جیم (۲۰۱۳)، آمبروسینی و همکاران (۲۰۱۴)، مالکی و مهدوی (۲۰۱۶)، موراکینیو و همکاران (۲۰۱۷)، و هراث و همکاران (۲۰۱۸) هریک به ترتیب اختلاف دماهایی در حدود ۲، ۳/۵، ۳، ۱/۵ و ۱/۹ درجه سلسیوس بین دمای هوای مجاور بام سبز و بام مرجع را نمایش داده‌اند. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت استفاده از تکنولوژی بام‌های سبز می‌تواند یکی از راهکارهای مناسب در جهت تعدیل شرایط آب و هوایی در محیط‌های شهری به منظور کاهش شدت جزیره حرارتی، کاهش مصرف انرژی، افزایش شرایط آسایش حرارتی، و افزایش سرانه فضای سبز باشد و در نهایت به زیباسازی محیط‌های شهری کمک کند.

### نتیجه‌گیری

به طور کلی، در خصوص اثر تعدیل‌کنندگی بام‌های سبز بر دمای هوا نتایج نشان داد که میزان اثرگذاری آن بسته به فصل سال و ساعات روز متغیر است؛ به طوری که با بررسی دماهای به دست آمده از برداشت‌های میدانی در فصول مختلف مشخص شد که در فصل بهار بیشترین اختلاف دما بین دو پشت‌بام سبز و مرجع در ساعات بعد از ظهر رخ داده است؛ یعنی دقیقاً چند ساعت بعد از حداکثر دمای روزانه در ساعت ۵ بعد از ظهر ۳/۰۲ درجه اختلاف دما ثبت شده است. بنابراین، در فصل بهار بیشترین اختلاف دما بین هوای مجاور دو بام در ساعات بعد از ظهر و شب بیشتر از ساعات اولیه صبح بوده است. در فصل تابستان هرچه از ساعات اولیه صبح به هنگام ظهر نزدیک می‌شویم مقدار اختلاف دمای هوا افزایش می‌یابد و تا هنگام شب این افزایش اختلاف در دمای هوای مجاور دو بام ادامه دارد و حداکثر آن در ساعت ۶ بعد از ظهر به ۳/۳۱ درجه می‌رسد و حداقل اختلاف دما نیز قبل از حداقل دمای روزانه در ساعت ۵ صبح رخ داده است. بر اساس نتایج بررسی اختلاف دمای به دست آمده از مطالعات میدانی بین دو پشت‌بام سبز و مرجع در فصل‌های بهار، تابستان، و پاییز، بیشترین اختلاف دما در فصل پاییز رخ داده است؛ به طوری که حداکثر اختلاف در فصل پاییز در ساعت ۲۳ شب به

مقدار ۳/۶۳ درجهٔ سلسیوس بوده است. در کل، با بررسی داده‌های میدانی در فصل‌های بهار، تابستان، و پاییز، نشان داده شد که مقدار اختلاف دمای هوای مجاور دو بام سبز و مرجع در ساعات پایانی روز و در هنگام شب بیشتر از ساعات اولیهٔ روز بوده است؛ یعنی زمانی که جزیرهٔ گرمایی هنگام شب به اوج خود می‌رسد (جدول ۲).

جدول ۲. میزان اثر تعدیل‌کنندگی بام سبز بر دمای هوای مجاور در فصول مختلف مورد مطالعه

فصل	بهار	تابستان	پاییز
میزان اختلاف			
حداکثر اختلاف °C	۳/۰۲ (۵ بعدازظهر)	۳/۳۱ (۶ بعدازظهر)	۳/۶۳ (۲۳ شب)
حداقل اختلاف °C	۱/۳۲ (۵ صبح)	۱/۵۶ (۵ صبح)	۱/۷ (۷ صبح)
میانگین °C	۲/۱۷	۲/۴۳	۲/۶۶

در فصل بهار اثر تعدیل بام سبز در دمای هوا از ساعات اولیهٔ صبح شروع و تا ساعات صبح مشاهده می‌شود. ولی هرچه به ساعات شب نزدیک می‌شویم مقدار اثر تعدیل‌کنندگی کاهش می‌یابد و مقدارش به صفر می‌رسد. در فصل تابستان نیز مانند فصل بهار بیشتر مقدار اثر تعدیل‌کنندگی دما در ساعات روز رخ داده است و در شب اثر چندانی مشاهده نمی‌شود. ولی در فصل پاییز میزان تعدیل دمای هوا بیشتر در ساعات شب رخ داده است؛ به طوری که از ساعت ۴ بعدازظهر شروع می‌شود و تا انتهای شب ادامه دارد. بنابراین، حداکثر تعدیل دمای هوا در فصل پاییز در ساعات شب رخ داده است، در صورتی که در فصل بهار و تابستان بیشتر میزان اثر تعدیل دمای هوا در ساعات میانی تا بعدازظهر مشاهده می‌شود. همچنین، براساس نتایج بررسی همبستگی بین داده‌های مدل در شرایط واقعی و داده‌های ایستگاهی (میدانی)، داده‌های بام سبز مدل و داده‌های واقعی در فصل بهار و تابستان دارای همبستگی معنادارند. در صورتی که همبستگی بین داده‌های بام سبز مدل و داده‌های واقعی در فصل پاییز و همچنین همبستگی بین داده‌های بام مرجع مدل و داده‌های واقعی در فصل تابستان و پاییز کم است، ولی بین داده‌های بام مرجع مدل و داده‌های واقعی در فصل بهار همبستگی معنادار با مقدار ۰/۵۳ مشاهده می‌شود.

## منابع

- خسروی، محمود و قبادی، اسدالله (۱۳۹۳). تبیین جایگاه سامانه بام سبز در تعدیل جزیره گرمایی شهر (نمونه موردی: کرج)، *دوفصل‌نامه پژوهش‌های بوم‌شناسی شهری*، ۲(۴): ۶۷-۷۸.
- رضوانی، محمد؛ پایروند، محمدمهدی؛ نوجوان، مهدی و صهباء، مهدی (۱۳۹۵). بررسی نقش بام‌های سبز به‌عنوان راهبردی در جهت ارتقای کیفیت محیط زیست شهری از منظر معماری پایدار، *فصل‌نامه علوم و تکنولوژی محیط زیست*، ۱۸: ۵۴۷-۵۵۶.
- شمسی‌پور، علی‌اکبر؛ مهدیان ماهفروزی، مجتبی و حسین‌پور، زینب (۱۳۹۱). واکاوی تغییرات مکانی هسته جزیره گرمایی شهر تهران، *پژوهش‌های جغرافیایی*، ۳(۳): ۱۲۷-۱۴۶.
- کشتکار فلاحتی، احمدرضا؛ انصاری، مجتبی و نازی دیزجی، سجاد (۱۳۸۹). توسعه سامانه بام سبز براساس معیارهای توسعه پایدار در ایران، *نشریه هویت شهر*، ۶: ۱۵-۲۸.
- مقبل، معصومه؛ عرفانیان سلیم رامین و قدیمی، مهرنوش (۱۳۹۶). ارزیابی اثر بام‌های سبز بر دما، رطوبت و غلظت دی‌اکسید کربن موجود در هوای شهر تهران و نقش آن‌ها در توسعه پایدار شهری، *مجله محیط زیست طبیعی*، ۷۰(۱): ۱۸۱-۱۹۵.
- مهدیان ماهفروزی، مجتبی؛ شمسی‌پور، علی اکبر و عزیز، قاسم (۱۳۹۴). اثرات گسترش فضای سبز بر الگوی جزیره گرمایی شهری (مطالعه موردی: بوستان ولایت)، *مجله پژوهش‌های جغرافیایی برنامه‌ریزی شهری*، ۳(۱): ۸۵-۹۹.
- Akbari, H. and Rose, L.S. (2008). Urban surfaces and heat island mitigation potentials, *Journal of the Human-Environmental System*, 11: 85-101.
- Ambrosini, D.; Galli, G.; Mancini, B.; Nardi, I. and Sfarra, S. (2014). Evaluating mitigation effects of urban heat islands in a historical small center with the ENVI-Met® climate model. *Sustainability*, 6(10): 7013-7029.
- Azeñas, V.; Cuxart, J.; Picos, R.; Medrano, H.; Simó, G.; López-Grifol, A. and Gulías, J. (2018). Thermal regulation capacity of a green roof system in the mediterranean region: The effects of vegetation and irrigation level, *Energy and Buildings*, 164: 226-238.
- Herath, H.M.P.I.K.; Halwatura, R.U. and Jayasinghe, G.Y. (2018). Evaluation of green infrastructure effects on tropical Sri Lankan urban context as an urban heat island adaptation strategy, *Urban Forestry & Urban Greening*, 29: 212-222.
- Karlessi, T.; Santamouris, M.; Synnefa, A.; Assimakopoulos, D.; Didaskalopoulos, P. and Apostolakis, K. (2010). Development and testing of PCM doped cool colored coatings to mitigate urban heat island and cool buildings, *Building and Environment*, pp. 1-10.
- Keshtkar, A.R; Ansari, M. and Nazi Dizji, S. (2010). Developing Green Roof System in Accordance with Sustainable Development, *Hoviatshahr*, 6: 15-28.
- Khosravi, M. and Ghobadi, A. (2014). Explaining the Position of the Green Roof System in Mitigation of the Urban Heat Island Case Study: Karaj, *Biannual Journal of Urban Ecology Researches*, 4: 67-78.
- Lundholm, J.T. and Williams, N.S. (2015). Effects of vegetation on green roof ecosystem services, In *Green roof ecosystems* (pp. 211-232). Springer, Cham.
- Mahdeloei, S.; Hamidi Farahani, F. and Shakori, M.J. (2012). The role of roof gardens in saving energy and reducing the heat island phenomenon, *Annals of Biological Research*, 3(4): 1704-1707.

- Malakooti, H. (2010). *Meteorology and air-quality in a mega-city: application to Tehran, Iran*, PhD Dissertation of École des Ponts ParisTech, Université Paris Est.
- Maleki, A. and Mahdavi, A. (2016). Evaluation of urban heat islands mitigation strategies using 3dimensional urban micro-climate model ENVI-met., *Asian Journal of Civil Engineering (BHRC)*, 17: 357-371.
- Moghbel, M. and Salim, R.E. (2017). Environmental benefits of green roofs on microclimate of Tehran with specific focus on air temperatur, ehumidity and CO2 content, *Urban Climate*, 20: 46-58.
- Moghbel, M.; Erfanian Salim, R. and Ghadimi, M. (2017). Evaluation of Green Roofs Impact on Air Temperature, Humidity and Carbon Dioxide Concentration in Tehran, *Journal of Natural environment*, 1: 181-195.
- Morakinyo, T.E.; Dahanayake, K.K.C.; Ng, E. and Chow, C.L. (2017). Temperature and cooling demand reduction by green-roof types in different climates and urban densities: A co-simulation parametric study, *Energy and Buildings*, 145: 226-237.
- Oberndorfer, E.; Lundholm, J.; Bass, B.; Coffman, R.R.; Doshi, H.; Dunnett, N.; Gaffin, S.; Kohler, M.; Liu, K.K.Y. and Rowe, B. (2007). Green Roofs as Urban Ecosystems: Ecological Structures, Functions, and Services, *BioScience*, 57(10): 823-833.
- Oke, T.R. (1982). The energetic basis of the urban heat island, *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 108: 1-23.
- Oke, T.R. (1995). The heat island of the urban boundary layer: characteristics, causes and effects, In *Wind climate in cities*, Springer, Dordrecht, pp. 81-107.
- Onishi, A.; Cao, X.; Ito, T.; Shi, F. and Imura, H. (2010). Evaluating the potential for urban heat-island mitigation by greening parking lots, *Urban Forestry & Urban Greening*, pp. 1-10.
- Peng, L. and Jim, C. (2013). Green-roof effects on neighborhood microclimate and human thermal sensation, *Energies*, 6(2): 598-618.
- Permpituck, S. and Namprakai, P. (2012). The energy consumption performance of roof lawn gardens in Thailand, *Renewable energy*, 40(1): 98-103.
- Pompeii, W.C. and Hawkins, T.W. (2011). Assessing the Impact of Green Roofs on Urban Heat Island Mitigation: A Hardware Scale Modeling Approach, *the Geographical Bulletin*, 52-61.
- Rosenzweig, C., Solecki, W. and Slosberg, R. (2006). Mitigating New York City's heat island with urban forestry, living roofs, and light surfaces. *A report to the New York State Energy Research and Development Authority*.
- Rezvani, M.; Pyravand, M.M.; Nojavan, M. and Sahba, M. (2016). Study of the Role of Green Roofs as a Strategy to Improve Urban Environmental Quality from the Sustainable Architecture Perspective, *Journal of Environmental Science and Technology*, 18: 547-556.
- Rosenfeld, A.H., Akbari, H., Romm, J.J. and Pomerantz, M. (1998). Cool communities: strategies for heat island mitigation and smog reduction, *Energy and Building*, 28: 51- 62.
- Shahmohamadi, P.; Cubasch, U.; Sodoudi, S. and Che-Ani, A.I. (2012). *Mitigating Urban Heat Island Effects in Tehran Metropolitan Area*, Chapter 11 of the book: Air Pollution – A Comprehensive Perspective.
- Shamsipour, A.A.; Mahdian Mahforouzi, M. and Hosseinpour, Z. (2012). Analysis of the Urban Heat Island Spatial Variability over Tehran, *Physical Geography Research Quarterly*, 33: 127-146.
- Smith, C. and Levermore, G. (2008). Designing urban spaces and buildings to improve sustainability and quality of life in a warmer world, *Energy Policy*, 36: 4558-4562.

- Solecki W.D.; Rosenzweig, C.; Pope, G.; Parshall, L. and Wiencke, M. (2008). *The Current and Future Urban Heat Island Effect and Potential Mitigation Strategies in the Greater Newark, New Jersey Region*, United States Department of Energy (DOE).
- Suomi, J., Käyhkö J. (2010). The impact of environmental factors on urban temperature variability in the coastal city of Turku, SW Finland, *International Journal of Climatology*, DOI: 10.1002/joc.2277.
- Synnefa, A.; Karlessi, T.; Gaitani, N.; Santamouris, M.; Assimakopoulos, D.N. and Papakatsikas, C. (2011). Experimental testing of cool colored thin layer asphalt and estimation of its potential to improve the urban microclimate, *Building and Environment*, 46: 38-44.
- Yamamoto, Y. (2006). Measures to mitigate urban heat islands, *NISTEP Science & Technology Foresight Center*.